

⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑯ Offenlegungsschrift
⑯ DE 197 09 228 A 1

⑯ Int. Cl. 6:
H 01 L 33/00
H 01 S 3/025

DE 197 09 228 A 1

⑯ Unionspriorität:
620518 22.03.96 US

⑯ Anmelder:
Hewlett-Packard Co., Palo Alto, Calif., US

⑯ Vertreter:
Schoppe, F., Dipl.-Ing.Univ., Pat.-Anw., 81479
München

⑯ Erfinder:
Krames, Michael R., Mountain View, Calif., US; Kish
jun., Fred A., San Jose, Calif., US

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Geordnete Grenzflächentexturierung für ein lichtemittierendes Bauelement

⑯ Dieses Verfahren bezieht sich auf die Herstellung von lichtemittierenden Halbleiterbauelementen, die mindestens eine geordnete texturierte Grenzfläche aufweisen. Die gesteuerte Grenzflächentexturierung mit einer geordneten Struktur wird an einer beliebigen oder an allen Grenzflächen eines derartigen Bauelements geschaffen, um die Lichtextraktion aus diesen Grenzflächen zu erhöhen, und somit das Verfahren des Bauelements zu verbessern. Die geordnete Grenzflächentexturierung bietet eine Verbesserung der Lichtextraktion durch Erhöhen der Transmission von optischer Leistung aus dem Bauelement in den Raum. Diese Verbesserung ist möglich, da die geordnete Grenzflächentexturierung folgende Konsequenzen hat: 1) eine Verringerung der Fresnel-Verluste an der Grenzfläche zwischen dem Bauelement und dem Raum und, 2) eine Änderung oder Erhöhung der Winkelbandbreite des Lichts, das Leistung in den Raum transmittieren kann. Dieser letztere Effekt kann auf eine Änderung oder Vergrößerung des Austrittskegels an der Grenzfläche zurückgeführt werden. Beide Wirkungen können in einer Gesamterhöhung des Gesamtlichtextraktionswirkungsgrades des LEDs resultieren.

DE 197 09 228 A 1

Beschreibung

Diese Erfindung bezieht sich auf die Herstellung von lichtemittierenden Halbleiterbauelementen. Insbesondere ist die Erfindung auf die Verbesserung der Lichtextraktion aus derartigen Bauelementen gerichtet.

Die Lichtextraktion aus einem lichtemittierenden Halbleiterbauelement (LED; LED = Light-Emitting Device) ist typischerweise aufgrund des großen optischen Brechungsindex ($n \approx 2,2-3,8$) des Halbleitermaterials relativ zu dem umgebenden Raum, typischerweise Luft ($n \approx 1$) oder transparentes Epoxidharz ($n \approx 1,5$), begrenzt. Der Betrag der Extraktion hängt stark von der makroskopischen Geometrie des LEDs und dem dreidimensionalen Emissionsprofil des Lichts ab, das in der aktiven Region erzeugt wird. Die lichtemittierende Fähigkeit der aktiven Region ist durch die Struktur der umgebenden Materialien, wie z. B. der epitaktischen Schichten, der begrenzenden oder "führenden" Bereiche, etc., definiert.

Das Problem der Lichtextraktion aus einem Halbleiter kann unter Verwendung eines Beispiels aus der elementaren elektromagnetischen Theorie verstanden werden: eine ebene elektromagnetische Welle, die von einem Medium (I) in ein anderes Medium (II) einfällt, muß eine Phasenanspannungsbedingung an der Grenzfläche zwischen den zwei Medien erfüllen, um transmittiert zu werden. Wellen, die diese Bedingung nicht erfüllen, werden der inneren Totalreflexion (TIR; TIR = Total Internal Reflection) unterworfen und breiten sich nicht in das Medium II aus. Wenn die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium I wesentlich kleiner als dieselbe des Mediums II ist, d. h. $n_1 > n_2$, und wenn die Grenzfläche zwischen diesen Medien planar oder nicht texturiert ist, beschränkt die Phasenanspannungsbedingung bei herkömmlichen Halbleiter-LEDs die Transmission auf Strahlen, die von Medium I in einem engen Winkelbereich einfallen, der um den senkrechten Einfall zentriert ist.

Bei einer Galliumphosphid- (GaP- ($n_1 \approx 3,3$)) Grenzfläche mit einem transparentem Epoxidharz ($n_2 \approx 1,5$) tritt die TIR für Einfallswinkel Θ_1 auf, die größer als der Grenzwinkel $\Theta_c = \arcsin(n_2/n_1) = 27.0^\circ$ sind. Es wird lediglich Licht transmittiert, das in den Austrittskegel $\Theta_1 < \Theta_c$ einfällt. Für eine isotrope Punktlichtquelle in GaP beträgt der Bruchteil des Lichts, der in den Austrittskegel an der Grenzfläche emittiert wird, lediglich $[1 - (\cos\Theta_c)/2] = 5.5\%$ des verfügbaren emittierten Lichtes. Wenn Fresnel-Verluste an der Grenzfläche eingeschlossen werden, wird etwa ein Anteil von 4.7% des verfügbaren emittierten Lichts durch die Grenzfläche in das Epoxidharz transmittiert. Für ein würfelförmiges Bauelement, das eine vollständig reflektierende untere Oberfläche, keinen Oberseitenkontakt und keine innere Absorption aufweist, gibt es sechs derartiger Grenzflächen, weshalb der Bruchteil des gesamten emittierten Lichts, der aus dem LED austritt $6 \times 4.7\% = 28.2\%$ beträgt.

Der oben beschriebene Effekt begrenzt stark den Extraktionswirkungsgrad der LEDs. Typische Bauelemente erzeugen Photonen an dem p-n-Übergang, die in einen weiten Richtungsbereich (nahezu isotropische Emission) emittiert werden. Als Folge kann ein großer Prozentsatz der emittierten Lichtstrahlen auf die Bauelemente/Raum-Grenzfläche mit großen, schießen Winkel einfallen. Wenn die Grenzfläche planar oder nicht texturiert ist, werden diese Strahlen der TIR unterworfen und nicht beim ersten Durchlauf austreten, weshalb

sie für eine Absorption in dem Bauelement empfänglich sind.

Verschiedene Verfahren zum Verbessern der Lichtextraktion aus einem LED sind vorgeschlagen worden.

5 Ein Verfahren liegt darin, die makroskopische Geometrie des LEDs zu ändern, um zu ermöglichen, daß das gesamte oder der größte Teil des in dem Bauelement erzeugten Lichts in einen Austrittskegel an der Grenzfläche mit dem Raum eintritt. Eine bevorzugte Form ist 10 ein kugelförmiges Bauelement mit einer aktiven Region als Punktquelle, die in der Mitte der Kugel angeordnet ist. Das gesamte emittierte Licht trifft im senkrechten Einfall auf die Grenzfläche und tritt in den Raum mit einem minimalen Fresnel-Verlust und ohne TIR aus. 15 Dierschke, u. a., in Applied Physics Letters 19, 98 (1971), bemerkten große Verbesserungen des Extraktionswirkungsgrades eines halbkugelförmigen Bauelements. Carr, in Infrared Physics 6, 1 (1966), beobachtete, daß andere Formen, wie z. B. Kegelstümpfe, Pyramidenstümpfe, etc., ebenfalls den Extraktionswirkungsgrad verbessern. Makroskopische Formungsverfahren sind kostenintensiv und weisen zugeordnete Herstellbarkeitsprobleme auf, wie z. B. eine ineffiziente Materialausnutzung und komplizierte Fabrikationsprozesse und 20 -Techniken.

Ein anderer Ansatz betrifft die Verwendung einer Antireflexionsbeschichtung an der oberen Oberfläche des Bauelements. Die Beschichtung führt zu verringerten Fresnel-Verlusten für Lichtstrahlen, die nahezu senkrecht an der Grenzfläche einfallen. Da die Dünnschichttypischerweise die Planarität bezüglich der Halbleiteroberfläche beibehält, wird jedoch der wirksame Austrittskegel an der Bauelemente/Raum-Grenzfläche nicht vergrößert, weshalb diese Technik eine begrenzte Verbesserung der Lichtextraktion schafft.

Ein anderer bekannter Ansatz betrifft ein Zufallstexturieren oder ein Aufrauhen der Oberflächen der Halbleiter-LEDs, wie es in Fig. 1 gezeigt ist und durch Schnitzer, u. a. in Applied Physics Letters 63, 2174 (1993), gelehrt ist. Eine Zufallsoberflächentextur läßt die Winkelverteilung der Lichtstrahlen in dem Bauelement zufällig werden. Dieses Zufälligmachen erhöht die Gesamtwahrscheinlichkeit, daß Licht nach mehreren Vielfachdurchläufen durch die Bauelementstruktur in einen Austrittskegel eintritt. Licht, das von der aktiven Region emittiert wird, trifft mehrmals auf die obere Oberfläche auf, bevor dasselbe in einen Austrittskegel eintritt. In den Applied Physics Letters 62, 131 (1993), haben Schnitzer, u. a., angemerkt, daß sehr hohe externe Gesamtquantenwirkungsgrade ($> 72\%$) in optisch gepumpten Strukturen durch die Extraktion von Vielfachdurchlauf-Licht erreicht werden konnten. In diesem Fall wurde sorgfältig auf die Minimierung der Absorption in dem Bauelement geachtet. In einem praktischen, elektrisch gepumpten Bauelement verringern verlustbehaftete oder dämpfende Regionen in dem Bauelement (z. B. ein absorbierendes Substrat, die aktive Schicht, Defekte, dotierte Regionen, etc.) oder an den Enden desselben (d. h. Metallkontakte, Chipbefestigungsepoxidharz, etc.) wesentlich die Intensität von Vielfachdurchlauf-Lichtstrahlen und begrenzen somit die Extraktionswirkungsgradgewinne. Folglich schaffen Vielfachdurchlauf-Lichtextraktionstechniken lediglich eine bescheidene Verbesserung, da es in praktischen Bauelementen den Photonen nicht möglich ist, viele Durchläufe durch das Bauelement zu absolvieren, bevor sie absorbiert werden.

Ein weiteres bekanntes Verfahren besteht darin, die Photonen in Oberflächenplasmonmoden (in einer

Dünnfilmmetallschicht an der oberen Oberfläche) zu koppeln, die anschließend in Strahlungsmoden in den Raum ausgekoppelt werden. Kock, u. a., lehren in den Applied Physics Letters 57, 2327 (1990), daß eine periodische Oberflächenstruktur, die in Fig. 2 gezeigt ist, die in Verbindung mit einem Metalldünnsfilm verwendet wird, um das Plasmonmodenkoppeln zu verbessern, den Quantenwirkungsgrad von LEDs erhöhen kann. Diese Strukturen basieren auf dem Koppeln von Photonen aus dem Halbleiter in die Oberflächenplasmonen in der Metallschicht, die weiter in Photonen gekoppelt werden, die schließlich extrahiert werden. Die periodische Struktur ist ein eindimensionales Strichgitter mit kleinen Rillentiefen ($< 0,1 \mu\text{m}$). Die externen Gesamtquantenwirkungsgrade sind wahrscheinlich aufgrund von Ineffizienzen der Photon-zu-Oberflächenplasmon- und der Oberflächenplasmon-zu-Raumphoton-Umwandlungsmechanismen für diese Bauelemente gering (1,4–1,5%).

Ein effizientes Verfahren zum Verbessern der Lichtextraktion aus einem Halbleiter durch eine vorteilhafte Veränderung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Halbleitergrenzflächen ist wünschenswert.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine lichtemittierendes Bauelement mit einem hohen Extraktionswirkungsgrad zu schaffen.

Diese Aufgabe wird durch ein lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 1 und durch ein Verfahren zum Herstellen einer texturierten Grenzfläche gemäß Anspruch 16 gelöst.

Ein LED, das eine geordnete Grenzflächentextur aufweist, die in mindestens einer Dimension auf irgendeiner oder allen Grenzflächen eines LEDs periodisch ist, wird die Extraktion von Erst-Durchlauf-Licht verbessern. Das Strukturieren der Grenzflächen wird gesteuert, um mehr Licht in den Raum zu lenken, ohne daß viele Vielfach-Durchläufe durch das Bauelement erforderlich sind, damit Licht austritt. Zusätzlich kann die geordnete Grenzflächentexturierung den Fresnel-Verlust für Lichtstrahlen verringern, die in den Raum austreten. Die regelmäßig strukturierte texturierte Grenzfläche kann Merkmalabstände aufweisen, die zu einer einzelnen Lichtwellenlänge in dem Bauelement vergleichbar sind. Die Formen und Abmessungen der Texturmerkmale werden derart gewählt, um die Lichtextraktion für die betreffende Anwendung zu optimieren.

Eine geordnete, gesteuerte Grenzflächentexturierung kann Lichtextraktionsgewinne durch Ändern oder Vergrößern des wirksamen Austrittskegels an der Bauelement-Raum-Grenzfläche zur Folge haben. Im Vergleich zu makroskopischen Formungstechniken betrifft die geordnete Texturierung einfachere Fabrikationsprozesse. Fresnel-Verluste können soweit reduziert werden, wie Reflexionen durch Antireflexionsbeschichtungen minimiert werden. Schließlich werden Lichtextraktionsgewinne unmittelbar für Erst-Durchlauf-Licht geschaffen, weshalb es nicht erforderlich ist, daß das Licht viele Vielfach-Durchläufe in der Bauelementstruktur vor dem Austritt durchführt.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein bekanntes Beispiel;

Fig. 2 ein weiteres bekanntes Beispiel;

Fig. 3 ein k-Raum-Diagramm;

Fig. 4 eine periodische Textur entlang einer Grenzfläche;

Fig. 5a–c Ordnungsanordnungen für die periodische

Textur;

Fig. 6 eine herkömmliche lichtemittierende Halbleiterdiode;

Fig. 7a–c ein Verfahren zum Texturieren der oberen 5 Oberfläche eines LEDs;

Fig. 8 ein texturiertes Bauelement mit transparentem Substrat;

Fig. 9 ein weiteres Ausführungsbeispiel eines texturierten Bauelements mit transparentem Substrat;

Fig. 10 ein weiteres Ausführungsbeispiel eines texturierten Bauelements mit transparentem Substrat;

Fig. 11 ein weiteres Ausführungsbeispiel eines texturierten Bauelements mit transparentem Substrat;

Fig. 12 ein weiteres Ausführungsbeispiel eines texturierten Bauelements mit transparentem Substrat;

Fig. 13 einen Resonanzhohlraum-LED-Chip, der zwei DBR-Spiegelstapel mit geordneten, texturierten Grenzflächen aufweist; und

Fig. 14 einen Resonanzhohlraum-LED-Chip, der einen DBR-Stapel- und einen Metallspiegel aufweist, mit einer geordneten texturierten Grenzfläche an der Oberfläche des transparenten Substrats.

Die elektromagnetischen Phasenpassungsbedingungen für eine planare Grenzfläche werden verändert,

25 wenn die Grenzfläche texturiert wird. Eine geordnete texturierte Struktur kann entworfen werden, um die Erst-Durchlauf-Lichtextraktion zu erhöhen, und um die Leistung zu erhöhen, die von einem Halbleiter in den Raum transmittiert wird. Die Effekte der geordneten Texturierung eines Halbleiter-LEDs können unter Bezugnahme auf Fig. 3, die ein Wellenimpuls- oder k-Raum-Diagramm für eine Grenzfläche zwischen GaP (n₁ ≈ 3,3) und transparentem Epoxidharz (n₂ ≈ 1,5) darstellt, verstanden werden. Die zwei Medien an der

30 Grenzfläche werden durch ihre zulässigen Wellenzahl-oberflächen dargestellt, d. h. Halbkreise mit Radien k_s bzw. k_e, mit k = k_{0n} = 2π/λ₀, wobei n der Materialbrechungsindex und λ₀ die jeweilige Freiraumwellenlänge sind. Ohne Texturierung fällt ein Strahl I aus dem Inneren des Bauelements mit einem großen, schießen Winkel, der größer als θ_c ist, auf die Grenzfläche ein, und erfüllt nicht die notwendige Phasenpassungsbedingung, um eine Transmission von Leistung in das Epoxidharz zu ermöglichen. Daher ist der Strahl I der Totalreflexion

35 unterworfen und transmittiert seine Leistung in einen reflektierten Strahl r₀ zurück in das GaP.

Bei der vorliegenden Erfindung wird die periodische Beabstand der geordneten Texturierung genügend klein gewählt, um die Phasenpassungsbedingung an der Grenzfläche zu ändern. In Fig. 3 verleiht eine periodische Textur entlang der Grenzfläche mit einer Wellenzahl K = 2π/λ entlang der Einfallsebene dem einfallenden Strahl einen Impuls und koppelt Energie in das Epoxidharz über die transmittierten Moden t₁, t₂ und t₃. Energie wird ferner in reflektierte Moden r₁, r₂, ... zurück in das GaP transmittiert. Die periodische Beabstand und die Form und Tiefe der einzelnen lokalen Merkmale der Textur werden derart gewählt, um die Leistungübertragung in die transmittierten Moden zu begünstigen.

Da die Lichtemission aus der aktiven Schicht im wesentlichen dreidimensional ist, sollte die Grenzflächentexturierung vorzugsweise eine Wellenvektorkomponente entlang der Einfallsebene für jeden azimutalen Winkel liefern. Folglich ist die Texturierungsanordnung statt eindimensional, wie ein einfaches Strichgitter, vorzugsweise zweidimensional entlang der Grenzfläche. Die zweidimensionale Natur der Texturierungsanord-

nung bietet eine beträchtliche Flexibilität. Beispielsweise ist es zulässig, daß die Periodizität in zwei orthogonale Richtungen entlang der Ebene der Grenzfläche unterschiedlich sein kann, wobei in diesem Fall ein anisotropes Strahlmuster erzeugt werden kann. Eine derartige Strahlstruktur kann bei gewissen Anwendungen nützlich sein.

Die Periode der geordneten Texturierung sollte kurz genug sein, um Leistung in den Raum durch Strahlen zu transmittieren, die normalerweise der TIR an der Grenzfläche unterworfen sind, jedoch nicht derartig kurz, daß dieselbe bedeutende Lichtbeträge von nahezu senkrecht einfallenden Strahlen (die andernfalls austreten würden) in TIR-Moden zurück in das Bauelement umlenkt. Aus diesem Grund können "spitze" Texturen weniger wünschenswert sein als "weiche" Texturmerkmale. Texturen mit "spitzen" Merkmalen sind jene, die mit Licht reagieren, um einige gebeugte Moden höherer Ordnung zu erzeugen. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, daß bedeutende Lichtbeträge in TIR-Moden zurück in das Bauelement gekoppelt werden können. Andererseits lenken Texturen mit "weichen" Merkmalen das Licht hauptsächlich in gebeugte Moden niedrigerer Ordnung um, die in einem richtigen Texturentwurf in den Raum austreten sollten. Ein typisches Texturprofil mit "spitzen" Merkmalen kann ein Rechteckwellenprofil (mit spitzen Ecken) sein, während ein Beispiel einer Textur mit "weichen" Merkmalen ein sinusförmiges Profil mit einer gleichmäßigen Variation entlang der Ebene der Grenzfläche sein kann.

Zum Zweck der vorliegenden Erfindung soll eine Grenzfläche als eine beliebige Region zwischen ungleichen Medien oder als eine beliebige benachbarte Kombination derartiger Regionen definiert sein. Außerdem soll eine Grenzfläche nicht nur durch diese ungleichen Medien sondern ferner durch ihren Ort und ihre Ausrichtung relativ zu dem Rest der Bauelementsgeometrie spezifiziert sein.

Fig. 4 zeigt eine LED mit einer geordneten texturierten oberen Oberfläche. Ein Lichtstrahl γ , der normalerweise der TIR unterworfen sein würde, transmittiert statt dessen beim Erreichen der oberen Oberfläche Leistung in den Raum. Diese Leistungsübertragung tritt bei dem ersten Durchlauf auf und verringert die Wahrscheinlichkeit eines optischen Verlusts in dämpfenden Regionen in oder an Kanten des Bauelements. Den Lichtstrahlen (γ') in der durch den Grenzwinkel einer nicht texturierten Oberfläche definierten Winkelbandbreite ist es ferner möglich, auszutreten. Der Gesamteffekt der geordneten Texturierung soll darin liegen, die Emission der aktiven Schicht an die Bauelementsgeometrie und an den umgebenden Raum anzupassen, derart, daß dies eine bedeutende Erhöhung des Gesamttextraktionswirkungsgrades zur Folge hat.

Die geordnete Texturierung an der Grenzfläche kann ferner in bedeutend verringerten Reflexionsverlusten für Lichtstrahlen resultieren, die aus dem Bauelement in den Raum transmittiert werden. Gaylord u. a. bemerkten in der Applied Optics 25, 4562 (1986), daß geordnete Oberflächentexturen gute Antireflexionscharakteristika über eine große Winkelbandbreite zeigen. Die Abruptheit der Brechungsindexstufe zwischen dem Bauelement und dem Raum wird verringert, um eine Zwischenregion mit einem effektiven Brechungsindexwert zu schaffen, der zwischen demselben des Bauelementmaterials und demselben des Raums übergeht.

Die Texturstruktur für optimales Licht hängt von der Winkelverteilung der Lichtemission, die an der Grenz-

fläche einfällt, und von der Form der Grenzfläche ab, wobei beides stark die Wahrscheinlichkeit definiert, daß ein Lichtstrahl auf die Grenzfläche mit einem gegebenen Winkel trifft. Wenn die aktive Region eines LEDs aus vielen (nahezu) isotropen Emittoren besteht, dann muß der Texturentwurf derart sein, daß Licht, das auf eine ebene Grenzfläche einfällt, wirkungsvoll über einen großen Winkelbereich transmittiert werden muß, d. h. daß die Transmission an der geordneten Grenzfläche eine große Winkelbandbreite aufweisen muß. Wenn die Emission der aktiven Region anisotrop ist, d. h. bei Mikrohohlraumemission, sollte die geordnete Texturierung wirkungsvoll innerhalb der Winkelbandbreite transmittieren, die aus der anisotropen Emission und der Ausrichtung der Grenzfläche (n) resultiert.

Die Geometrie oder Form der LED-Struktur definiert die Winkellichtverteilung, die auf jede Grenzfläche trifft. In einer würfelförmigen Struktur könnte ein sinnvoller maximaler Einfallswinkel auf einer ebenen oberen Oberfläche $\tan^{-1}(1/2a/h)$ sein, wobei a die Breite des Würfels und h die Entfernung der aktiven Schicht zu der oberen Oberfläche ist (z. B. $a = 0.254$ mm = 10 Millizoll, $h = 0,0508$ mm = 2 Millizoll, $\Theta_{\max} = 82^\circ$). Licht, das sich innerhalb des Grenzwinkels an den Seitenoberflächen befindet, wird jedoch aus den Seitenoberflächen austreten, es gilt somit $\Theta_{\max} = 90^\circ - \Theta_c = 63^\circ$ (für $n_s = 3,3$, $n_e = 1,5$). Folglich sollte die geordnete Texturierung derart entworfen sein, daß dieselbe wirkungsvoll über eine Winkelbandbreite von $-63^\circ < \Theta < 63^\circ$ transmittiert.

Zusätzlich sollte die dreidimensionale Natur der Winkellichtverteilung berücksichtigt werden. Beispielsweise beträgt für einen isotropen Emitter unter einer planaren Grenzfläche der Prozentsatz des Lichts, das für $|\Theta| < 20^\circ$ emittiert wird $(1 - \cos 20^\circ)/2 = 3\%$. Dies ist weniger, als für $20^\circ < |\Theta| < 40^\circ$ emittiert wird, wo der Prozentsatz $(\cos 20^\circ - \cos 40^\circ)/2 = 8.7\%$ beträgt. Für $40^\circ < |\Theta| < 60^\circ$ beträgt der Prozentsatz $(\cos 40^\circ - \cos 60^\circ)/2 = 13.3\%$. Die geordnete Texturierung der Grenzfläche kann, wenn dies gewünscht ist, entworfen werden, um Licht wirkungsvoller bei größeren schiefen Winkeln auf Kosten von kleineren Winkeln zu transmittieren. Dies kann aufgrund des Kompromisses, der im allgemeinen zwischen dem Beugungswirkungsgrad und der Winkelbandbreite in beugenden Strukturen inhärent ist, wichtig sein. Es kann folglich wünschenswert sein, daß Gitter auf einen maximalen Extraktionswirkungsgrad bei großen schiefen Winkeln (bei denen der Großteil des Lichts einfällt), einzustellen.

Die aktive Schicht und die umgebenden Strukturen können ebenfalls die Winkellichtverteilung beeinflussen, die an einer Grenzfläche einfällt. Für eine dicke dämpfende aktive Schicht ist die Lichtemission bei größeren Werten von e aufgrund der längeren möglichen Weglänge in der dämpfenden aktiven Schicht weniger wahrscheinlich. Die Winkelbandbreite des Lichts, das an der oberen Oberfläche einfällt, würde relativ zu einem Bauelement mit einer dünnen aktiven Schicht oder einer aktiven Schicht mit hohem internen Quantenwirkungsgrad (hohe Wahrscheinlichkeit der Photonenrückgewinnung) verringert.

Bei Resonanzhohlraum-LED-Strukturen (siehe z. B. Schubert u. a., Science 265, 943 [1994]) haben die aktive Schicht und der Hohlraumentwurf starke Auswirkungen auf die Winkellichtverteilung. Die aktive Schicht ist in einem kleinen vertikalen Hohlraum positioniert, der durch hochreflektierende Spiegel definiert ist, die reflektierende Metalle, dielektrische Verteilter-Bragg-Re-

lektor- (DBR-; DBR = Distributed-Bragg-Reflector) Stapel, oder Halbleiter-DBR-Stapel sein können. Wenn die aktive Schicht an einem Hohlraum-Feldschwingungsbauch positioniert ist und die DBR(s) auf maximale Reflexion bei senkrechtem Einfall eingestellt sind, wird ein großer Teil des emittierten Lichts in einem engen Winkelbereich um 0° gehäuft. Wenn jedoch die aktive Schicht von einem Feldschwingungsbauch entfernt positioniert ist, oder der Hohlraum verstimmt ist, ist die Winkellichtverteilung auf einen engen Bereich von neben der Achse liegenden Winkeln begrenzt. Der Prozentsatz des gesamten emittierten Lichts nimmt mit schieferen Winkel (relativ zu der oberen Oberfläche) für eine gegebene Winkellichtverteilung zu, wie es vorher dargelegt wurde. Wenn ein Anteil von 80% des nach oben emittierten Lichtes auf einen engen Bereich von Winkeln begrenzt werden könnte, für den eine geordnete texturierte Grenzfläche eine Transmission von 60% liefern könnte, würde der sich ergebende Aufwärtsextraktionswirkungsgrad $0.8 \times 0.6 = 48\%$ betragen.

Die besonderen Formen, Abmessungen und Anordnungen der geordneten Texturierung, die für ein optimales Verhalten notwendig sind, sind anwendungsabhängig. Eine Merkmalsform kann ein kegelförmiger Vorstand oder eine kegelförmige Vertiefung sein. Eine typische geordnete Anordnung kann ein quadratisches, rechteckiges oder hexagonal-close-packed (HCP-; HCP = Hexagonal-Close-Packed) Array sein. Diese Anordnungen sind in den Fig. 5a-c dargestellt, von denen jede eine Draufsicht einer geordneten texturierten Grenzfläche zeigt. Die periodischen Beabstandungen sind vorzugsweise vergleichbar oder kleiner als eine Wellenlänge des Lichts in dem Bauelement. Querschnittsprofile der texturierten Grenzfläche zeigen Spitzen und Täler gemäß den Vorständen oder Vertiefungen und die Ausdehnung jedes einzelnen Merkmals entlang der Ebene der Grenzfläche, die durch die Halbwertsbreiten- (FWHM-; FWHM = full-width-at-half-maximum = Halbwertsbreite) Höhe oder Tiefe derselben definiert ist. Dieselbe kann jedoch ebenfalls mit einigen Vielfachen vergleichbar oder kleiner als die Lichtwellenlänge in dem Bauelement sein. Die maximale Höhe oder Tiefe eines Vorstands oder einer Vertiefung kann vergleichbar zu einer oder einigen Lichtwellenlängen in dem Bauelement sein. Die Beabstandung der geordneten Struktur ist Wellenlängen-abhängig. Es ist daher wesentlich die elektromagnetische Phasenangepassungsbedingung an der Grenzfläche optimal zu verändern, um die Gesamtleistung zu erhöhen, die in den Raum transmittiert wird. Die Ausdehnung und die Tiefe der topologischen Merkmale der Struktur bewirken die Effizienz der Phasenbedingungsveränderung, daß Licht transmittiert wird. Die Struktur kann ferner "gechirpt" oder auf andere Art und Weise bezüglich ihrer einzelnen topologischen Merkmal-Größen und/oder -Formen verteilt sein, um die gesamte optische Transmission und die Bauelementsleistung zu maximieren.

Es seien zum Beispiel LEDs für sichtbare Wellenlängen betrachtet, bei denen $\lambda \approx 400-700$ nm ist. In diesem Fall zeigt die geordnete Texturierung für die Grenzfläche, die in Fig. 4 beschrieben ist, eine Quadrat- oder HCP-Anordnung. Die Merkmale haben potentiell eine Ausdehnung von $0.1-0.9$ μm und sind mit $0.1-5.0$ μm beabstandet, und zwar mit Merkmalstiefen in der Größenordnung von $0.2-15.0$ μm . Die Periode oder Beabstandung muß kurz genug sein, um Licht bei großen schießen Winkeln in den Raum zu koppeln. Für typische LED-Strukturen für sichtbare Wellenlängen

beträgt die Periode weniger als 1.0 μm . Die maximale Tiefe der Merkmale kann 0.5 μm oder größer sein, um höhere Extraktionswirkungsgrade zu erreichen. Da die interessierenden Grenzflächen zweidimensional sind, muß die Gitterstruktur zweidimensional sein und nicht eindimensional wie ein einfaches Gitter.

Ein herkömmliches lichtemittierendes Halbleiterbauelement ist in Fig. 6 gezeigt. Dasselbe weist epitaktische Halbleiterschichten (1) auf, die eine aktive Region mit einem p-n-Übergang (2) auf einem Substrat (3) mit elektrischen Kontakten (4), die zur Strominjektion geschaffen sind, enthalten. Die elektrischen Kontakte sind, wie es in Fig. 6 gezeigt ist, sowohl an der oberen als auch an der unteren Oberfläche des Bauelements geschaffen, es ist jedoch möglich, beide Kontakte auf eine Seite des Bauelements zu setzen, um den Lichtextraktionswirkungsgrad aus der anderen Seite zu erhöhen. In diesem letzteren Fall muß das Substrat (3) weder leitfähig noch ein Halbleiter sein, vorausgesetzt, daß die epitaktischen Schichten (1) auf das Substrat aufgewachsen oder an demselben auf eine zufriedenstellende Art und Weise befestigt werden können.

Die Fig. 7a-c stellen Prozeßablaufschriften zum Texturieren der oberen Oberfläche eines lichtemittierenden Bauelements dar. Ein elektro- oder photosensitiver Dünnfilm (5) wird an der Oberseite des Bauelements (Fig. 7a) angebracht. Der Film wird unter Verwendung einer Elektronenstrahlolithographie, einer Laserstrahlinterferenz oder von UV-Strahlung etc. belichtet, wonach die gewünschte Struktur (6) entwickelt wird (Fig. 7b). Nach dem Entwickeln schützt die verbleibende maskierende Struktur Bereiche des Bauelementsmaterials vor einem folgenden Ätz- oder Fräsprozess (z. B. einem Ionenfräsen, einem reaktiven Ionenätzen, einem naßchemischen Ätzen, einem elektrochemischen Ätzen, einem photochemischen Ätzen, einem chemisch unterstützten Ionenstrahlätzen oder einer Kombination davon, etc.), um eine gewünschte Struktur (7) in das Bauelementsmaterial zu übertragen, wonach die maskierende Schicht (6) entfernt wird (Fig. 7c). Der Metallkontakt dient als eine Maske gegen den Ätz- oder Fräsprozess und wird selber nicht texturiert. Der photosensitive maskierende Film (5) kann durch Verwenden einer selbststrukturierenden Ätztechnik (z. B. dem photoelektrochemischen Ätzen, einem lokalen Laserschmelzen und einem selektiven Ätzen von geschmolzenen Regionen, etc.) beseitigt werden, wobei der chemische, mechanische oder elektrische Zustand des Bauelementsmaterials gemäß der Struktur verändert wird und anschließend oder gleichzeitig Material selektiv entfernt wird, um eine geordnet texturierte Grenzfläche zu erzeugen.

Alternativ wird ein dielektrischer maskierender Film oder ein anderer Dünnfilm (Metall, Polymer, etc.) vor dem photosensitiven Film aufgebracht. Der Typ und die Dicke dieser Maske wird derart gewählt, um das notwendige Ätzverhältnis zwischen dem maskierenden Material und dem Bauelementsmaterial zu erreichen, um eine tief geätzte Texturierung zu erreichen, die für eine optimale Lichtextraktion erwünscht sein kann. Zusätzlich kann dieser Film ein Teil des fertigen Bauelements sein, da derselbe eine geeignete transparente Fensterschicht ist, die texturiert werden kann, um die Lichtextraktion in den Raum zu verbessern. Dies kann nützlich sein, wenn der Index des Dielektrikums größer als derselbe des Raums ist, da die resultierende Struktur eine Vergrößerung des wirksamen Austrittskegels aus dem Bauelement schafft.

Fig. 8 stellt ein weiteres Ausführungsbeispiel dar, bei

dem die obere und die rückseitige Oberfläche eines Bauelements mit transparentem Substrat texturiert sind. Da die aktive Region typischerweise bei der Emissionslänge stark dämpft, ist die rückseitige Oberfläche texturiert, um das Licht, das von der rückseitigen Oberfläche zu den Seiten des Bauelements hin reflektiert wird, umzulenken, um einen zweiten Durchlauf durch die aktive Region und den Oberseitenmetallkontakt zu vermeiden. Die Texturierung der oberen und unteren Oberfläche kann unterschiedlich sein, da das Licht an beiden Seiten unterschiedlich umgelenkt wird. Im Fall eines Bauelements mit einer dünnen aktiven Schicht oder eines Bauelements mit hohem internen Quantenwirkungsgrad ($> 80\%$), bei dem eine kleine Dämpfung in dieser Schicht auftritt, kann die Textur der unteren Oberfläche statt dessen entworfen werden, um Licht in einen Austrittswinkel der oberen Oberfläche zu lenken.

Fig. 9 stellt ein Ausführungsbeispiel dar, bei dem die Rückseitenmetallkontakte auf die texturierte Oberfläche gesetzt sind. Alternativ können die Vorderseiten- und/oder Rückseitenkontakte außerhalb der texturierten Regionen angebracht sein. In dem Fall von Fig. 9 bietet die Wellung der Rückseitenmetallkontakte (9) einen vergrößerten Oberflächenbereich für eine gegebene Kontaktabmessung an, wodurch diese Kontakte einen verringerten elektrischen Widerstand im Vergleich zu ebenen Kontakten der gleichen Abmessung zeigen. Die gewellten Kontakte können relativ zu den ebenen Kontakten bei einem gleichen Kontaktwiderstand kleiner dimensioniert sein. Sie können weniger dämpfend als herkömmliche ebene Kontakte sein, da die Wellung als eine wirkungsvolle reflektierende oder beugende Barriere für das einfallende Licht dienen kann. Die Strukturierung in den Kontaktregionen kann unabhängig von der Strukturierung auf dem Rest des Bauelementsgrenzflächen für erhöhte TIR- oder Fresnel-Reflexion in den Kontaktregionen optimiert werden, um die Dämpfung an den Kontakten zu verringern. Die optimale Strukturierung in diesen Regionen kann ähnlich zu der optimalen Strukturierung anderer Regionen des Bauelements sein oder nicht.

Fig. 10 stellt ein Ausführungsbeispiel dar, das eine makroskopische Formung und eine Grenzflächentexturierung kombiniert. Die Grenzflächentexturierung ist an einer oder sowohl an der Oberseite als auch an der Unterseite eines kegelstumpfförmigen lichtemittierenden Bauelements geschaffen. Dieses Bauelement mit einem transparenten Substrat wird bezüglich zu dem Bauelement von Fig. 9 verkehrt herum angebracht, um die Extraktionsgewinne auszunützen, die mittels des dicken kegelförmigen Fensters geschaffen sind. Die Texturierung kann auf der Rückseite durchgeführt und entworfen werden, um Licht auf die Seiten des Bauelements umzulenken, um das Durchlaufen desselben durch die dämpfende aktive Region zu vermeiden. Alternativ können sowohl die Oberseiten als auch die Rückseitenmetallkontakte gewellt oder "flach" sein. Das kegelförmige Fenster trägt dazu bei, um einen großen Teil des Lichts, das von der aktiven Region emittiert wird, auf die obere Oberfläche mit nahezu senkrechtem Einfall auf derselben umzulenken. Dies verringert die Winkelbandbreite des Lichts, das an der oberen Oberfläche einfällt, und ermöglicht einen wirkungsvoller Texturierungsentwurf, da im allgemeinen ein Kompromiß zwischen dem Beugungswirkungsgrad und der Bandbreite in beugenden Strukturen besteht. Der umgekehrte Fall tritt ebenfalls auf, bei dem eine Vergrößerung des wirksamen Austrittskegels an der oberen Oberfläche (aufgrund der

Texturierung) lockere Entwurfseinschränkungen beim Chip-Formen ermöglichen kann, was zu weniger aufwendigen Entwürfen führt. Die Texturierung der oberen Oberflächen schafft eine maximale Lichtextraktion bei der interessierenden Wellenlänge und den interessierenden Winkeln, während die Kontaktbereichstexturierung entworfen sein kann, um die Reflektivität zu maximieren, um die Dämpfung an den Metallkontakten zu verringern.

Fig. 11 stellt ein Ausführungsbeispiel dar, das die geordnete Grenzflächentexturierung mit dem Chipformen kombiniert. Es wird, wegen der Ähnlichkeit derselben zu einer Halbkugel, eine Pyramidenstumpfform ausgewählt. Es wird eine Texturierung auf mindestens einer der freiliegenden Oberflächen geschaffen. Vorzugsweise wird dies an abgeschrägten Seiten (10) des Bauelements sowie an der Oberseite und Unterseite durchgeführt, um den Fresnel-Verlust zu verringern und den Extraktionswirkungsgrad zu erhöhen. Das Strukturieren auf den abgeschrägten Oberflächen (10) wird am besten durch berührungslose Strukturierungstechniken bewirkt, wie z. B. dem photochemischen Ätzen unter Verwendung eines Lasers. Zusätzliche Variationen können ebenso bestimmte Typen von geordneten Texturierungen an den äußersten Kanten eines Bauelements umfassen, um die Emissionsstrukturen zu verändern, und/oder um den Extraktionswirkungsgrad weiter zu erhöhen.

Fig. 12 stellt ein Bauelement mit einer geordneten texturierten Grenzfläche nahe der aktiven Schicht dar. Eine transparente Fensterschicht (12) ist an der texturierten Grenzfläche befestigt. Diese Fensterschicht kann geschaffen sein, um die Stromausbreitung von dem Oberseitenkontakt für eine gleichmäßige Injektion in die aktive Schicht zu erhöhen. Die geschichtete oder "gesandwichte" Grenzfläche zwischen der Fensterschicht und der texturierten Grenzfläche würde normalerweise aus Leerräumen (13) bestehen, diese Leerräume können jedoch mit einem geeigneten Material (z. B. einem Dielektrikum, einem Halbleitermaterial, einem Eigenoxid) vor der Fensterschichtbefestigung gefüllt werden, um eine strukturelle Integrität zu schaffen, und um die gegenwärtige Stompumpgeometrie des Bauelements vorteilhaft zu modifizieren. Die Texturierung und die Wahl des mehrschichtigen oder "gesandwichten" Materials sollten derart gewählt werden, um die elektrischen und optischen Charakteristika des Bauelements für die interessierende Anwendung zu optimieren. Die Nähe der geordneten Texturierung zu der aktiven Schicht kann verbesserte Lichtemissionscharakteristika zur Folge haben, wobei Licht gezwungen wird, nach oben aus der aktiven Schicht zu emittieren, und zwar mit einem nahezu senkrechten Einfall auf der oberen Oberfläche. Bei diesem letzteren Fall sollte das Gitter innerhalb von $\approx 5 \lambda$ und vorzugsweise innerhalb von weniger als $\approx 2 \lambda$ bezüglich der aktiven Region platziert sein. Das Gitter kann ebenfalls unterhalb der aktiven Schicht platziert sein, um Licht nach oben oder vorzugsweise zu den Kanten des LEDs hin umzulenken.

Fig. 13 zeigt ein LED mit einer Resonanzhohlräum-(RC; RC = Resonant Cavity) Struktur (20), die aus einer aktiven Region (2), die zwischen zwei DBR-Spiegelstapeln (22A, 22B) geschichtet ist, besteht. Der Hohlräum wird verstimmt, um eine anisotrope Emission aus der aktiven Schicht (eine neben der Achse liegende Emission) zur Folge zu haben. Die geordnete texturierte obere Oberfläche ist entworfen, um dieses Licht effizient in den Raum hinaus zu koppeln. Wenn das Bauele-

ment auf einem transparenten Substrat angebracht wird, kann die untere Oberfläche texturiert werden, um vorzugsweise das Licht in Austrittskegel an den Seiten des Bauelements zu lenken. Zusätzlich können die texturierten Grenzflächen statt dessen in dem Bauelement an Grenzflächen, die näher bei der aktiven Region liegen, eingebettet sein. 5

Fig. 14 zeigt ein RCLED, bei dem eine Seite des Hohlraums (20) durch einen Hochreflexionsmetallspiegel (24) definiert ist und die andere Seite ein DBR-Stapel (22) ist. 10 Das Bauelement ist mit dem (transparenten) Substrat nach oben angeordnet. Der Hohlraum wird für eine neben der Achse liegende Emission verstimmt und die obere Oberfläche wird texturiert, um ein wirkungsvolles Koppeln der Emission in den Raum zu schaffen. Zusätzlich können die RCLED-Bauelemente der Fig. 13 und 14 (zusätzlich zu der Texturierung) geformt werden, um 15 das Licht aus der neben der Achse liegenden Emission optimal auszukoppeln.

20

Patentansprüche

1. Lichtemittierendes Bauelement, mit folgenden Merkmalen:

einem Bauelement, das folgende Merkmale aufweist:

ein Substrat (3), 25
eine p-n-Übergangsregion (2) mit mehreren Schichten, wobei Teilsätze der mehreren Schichten eine entgegengesetzte Polarität aufweisen, derart, daß ein p-n-Übergang gebildet ist, wobei sich eine der Schichten neben dem Substrat befindet, 30
eine transparente Fensterschicht, die neben der p-n-Übergangsregion positioniert ist, und
elektrische Kontakte (4), die mit der p-n-Über- 35
gangsregion verbunden und wirksam sind, um den p-n-Übergang in Flußrichtung vorzuspannen; und
einer primären Grenzfläche (7, 8, 11), die in dem Bauelement positioniert ist, die mit sich wiederholenden Merkmalen in mindestens einer ausgewählten 40
Richtung texturiert ist, die eine zugeordnete Periodizität in jeder der ausgewählten Richtungen aufweist, um die Lichtextraktion zu erhöhen, und innerhalb einer Periode ein Querschnittsprofil aufweist, das mindestens einen Berg und mindestens 45
ein Tal aufweist.

2. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 1, bei dem die primäre Grenzfläche sich wiederholende Merkmale in mindestens zwei ausgewählten Richtungen aufweist, die identische Periodizitäten 50 aufweisen.

3. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem die primäre Grenzfläche sich wiederholende Merkmale aufweist, die ein rechteckiges Array bilden.

4. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem die primäre Grenzfläche sich wiederholende Merkmale aufweist, die eine hexagonal eng gepackte Struktur aufweisen.

5. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die maximale Berg-zu-Tal-Tiefe zwischen 0,2 und 15 μm liegt.

6. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Periodizitäten zugeordnete Perioden zwischen 0,1 und 65 5,0 μm aufweisen.

7. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem sich das Tal

innerhalb von zwei Mikrometern bezüglich der p-n-Übergangsregion befindet.

8. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche 1, bei dem die Berge und Täler des Querschnittsprofils der primären Grenzfläche eine Halbwertsbreite von 10–90% einer Periode der texturierten Anordnung aufweisen.

9. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche 1, bei dem ein Teil der primären Grenzfläche elektrisch leitend ist.

10. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, das ferner einen metallischen Film an einem Teil der primären Grenzfläche aufweist.

11. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens ein gewisser Teil des Tals mit einem Material ausgefüllt ist, das einen Brechungsindex von weniger als 2,0 aufweist.

12. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 11, bei dem:

das Material, das einen Brechungsindex von weniger als 2,0 aufweist, ein dielektrisches Material ist; und

das Bauelement ferner eine Schicht aus Metall aufweist, die über dem dielektrischen Material positioniert ist.

13. Lichtemittierendes Bauelement gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, das ferner folgende Merkmale aufweist:

N sekundäre Grenzflächen (10) (wobei $N \geq 1$ gilt), die in dem Bauelement positioniert sind, wobei jede der sekundären Grenzflächen mit sich wiederholenden Merkmalen in mindestens einer ausgewählten Richtung texturiert ist, eine Periodizität in jeder ausgewählten Richtung aufweist, um die Lichtextraktion zu erhöhen, und innerhalb jeder Periode ein Querschnittsprofil aufweist, das mindestens einen Berg und mindestens ein Tal aufweist.

14. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 13, bei dem mindestens eine der N sekundären Grenzflächen und die primäre Grenzfläche unterschiedliche Querschnittsprofile aufweisen.

15. Lichtemittierendes Bauelement gemäß Anspruch 13 oder 14, bei der mindestens eine der N sekundären Grenzflächen und die primäre Grenzfläche mit unterschiedlichen Periodizitäten texturiert sind.

16. Verfahren zum Herstellen einer texturierten Grenzfläche für ein lichtemittierendes Bauelement, mit folgenden Schritten:

Übertragen mindestens einer Struktur auf mindestens eine Grenzfläche des Bauelements, wobei jede Struktur sich wiederholende Merkmale aufweist, die eine Periodizität in mindestens einer ausgewählten Richtung aufweisen; und
Entfernen eines bestimmten Teils des Bauelementmaterials gemäß der Struktur, um eine Grenzfläche zu erzeugen, die mit den sich wiederholenden Merkmalen mit einer Periodizität in mindestens einer Richtung texturiert ist.

17. Verfahren gemäß Anspruch 16, bei dem der Schritt des Übertragens der Struktur folgende Schritte aufweist:

Aufbringen einer Schicht aus Photolack über die Grenzfläche des Bauelements;

Belichten eines Teils der Schicht aus Photolack, um die Struktur zu erzeugen; und

Entfernen der nicht strukturierten Regionen des Photolacks, um die Maskierungsschicht zu erzeugen.

18. Verfahren gemäß Anspruch 16, bei dem das Übertragen der Struktur folgende Schritte aufweist:

Aufbringen einer Schicht aus dielektrischem Material über die Grenzfläche des Bauelements; und
Aufbringen einer Schicht aus Photolack über die Schicht aus dielektrischem Material;

Belichten eines Abschnitts der Schicht aus Photolack, um die Struktur zu erzeugen;

Entfernen der nicht strukturierten Regionen des Photolacks; und

Ätzen der Schicht aus dielektrischem Material gemäß der Struktur.

19. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 16 bis 18, das ferner den Schritt des Ausfüllens zumindest des bestimmten Teils der Grenzfläche unter Verwendung eines Materials mit einem Brechungsin-

dex von weniger als 2,0 aufweist.

20. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 16 bis 19, das ferner den Schritt des Anbringens von elektrischen Kontakten an der Grenzfläche aufweist.

21. Verfahren gemäß Anspruch 16, bei dem der Schritt des Übertragens der Struktur den Schritt des Modifizierens des Zustands des Bauelementmaterials gemäß einer Struktur aufweist, wobei die Struktur sich wiederholende Merkmale aufweist, die eine Periodizität in mindestens einer Richtung aufweisen.

22. Verfahren gemäß Anspruch 21, bei dem der Schritt des Modifizierens und der Schritt des Entfernens gleichzeitig durchgeführt werden.

10

15

20

25

30

35

Hierzu 16 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

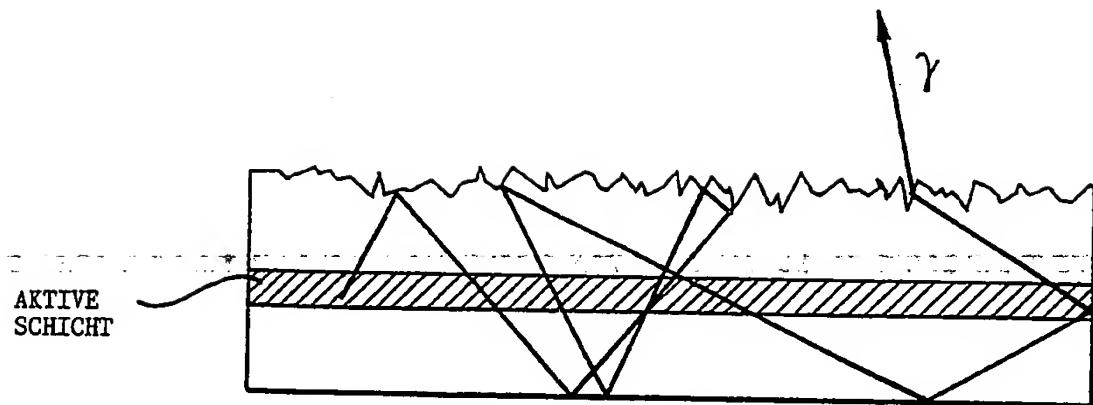


FIG. 1

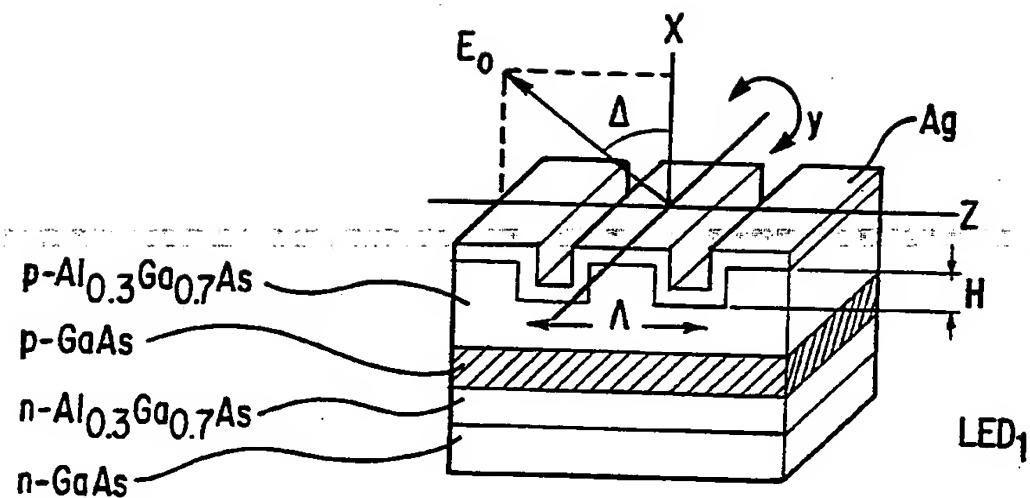


FIG. 2

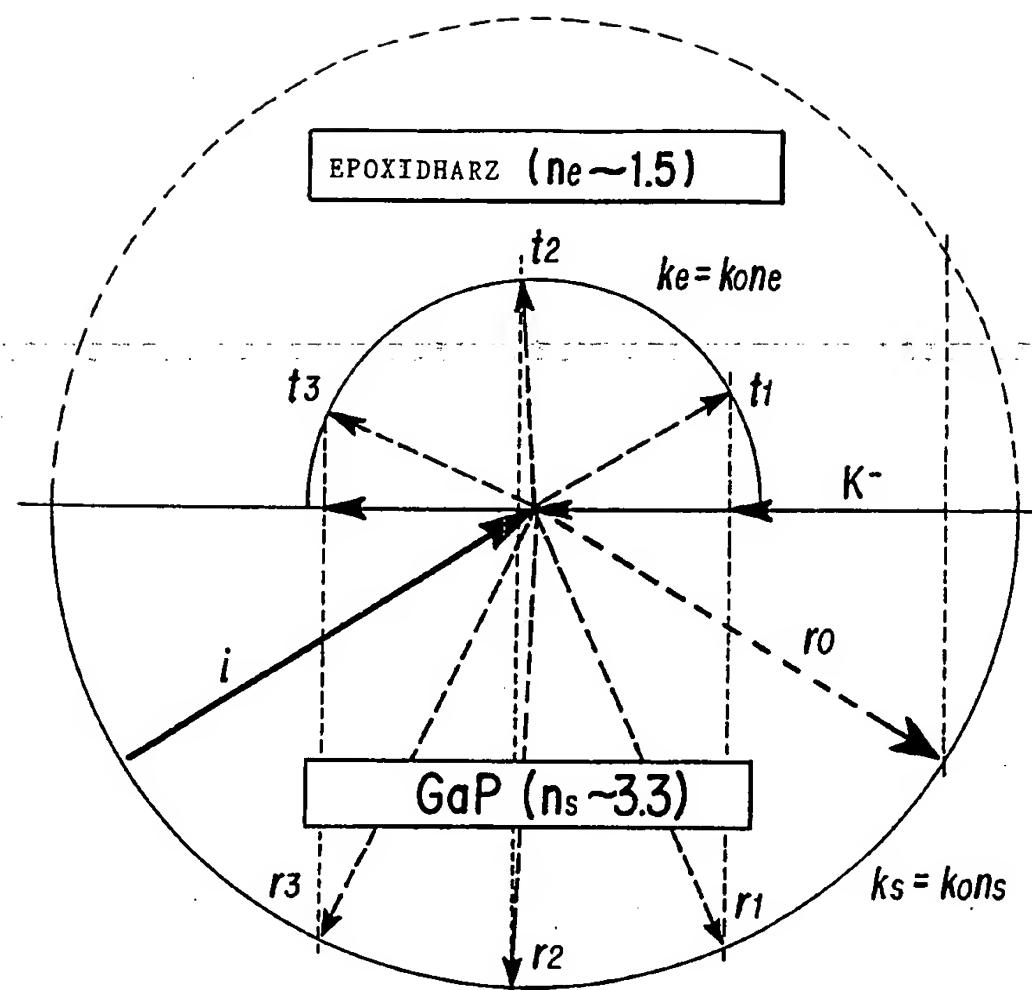


FIG. 3

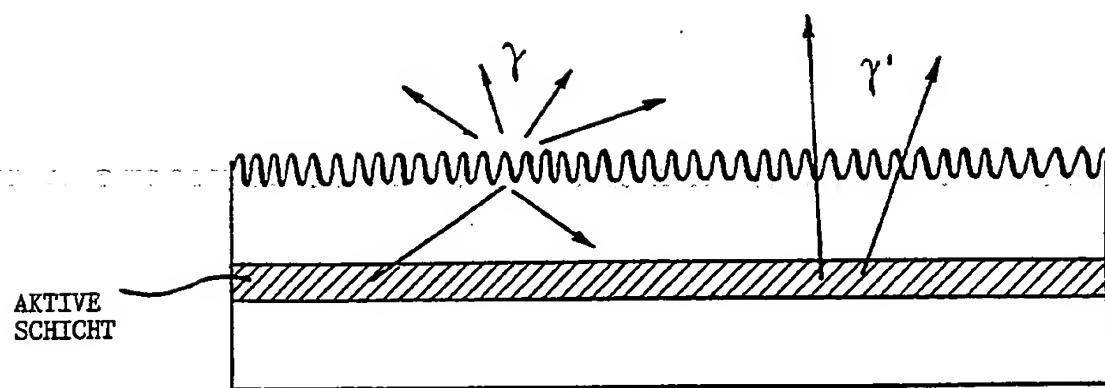


FIG. 4

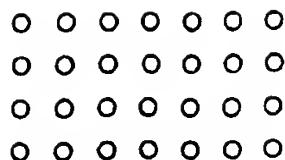


FIG. 5a

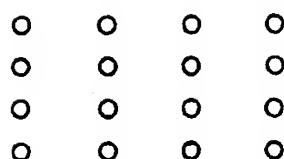


FIG. 5b

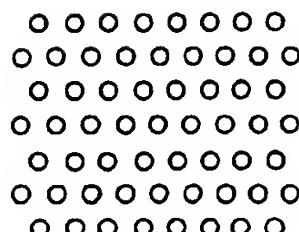


FIG. 5c

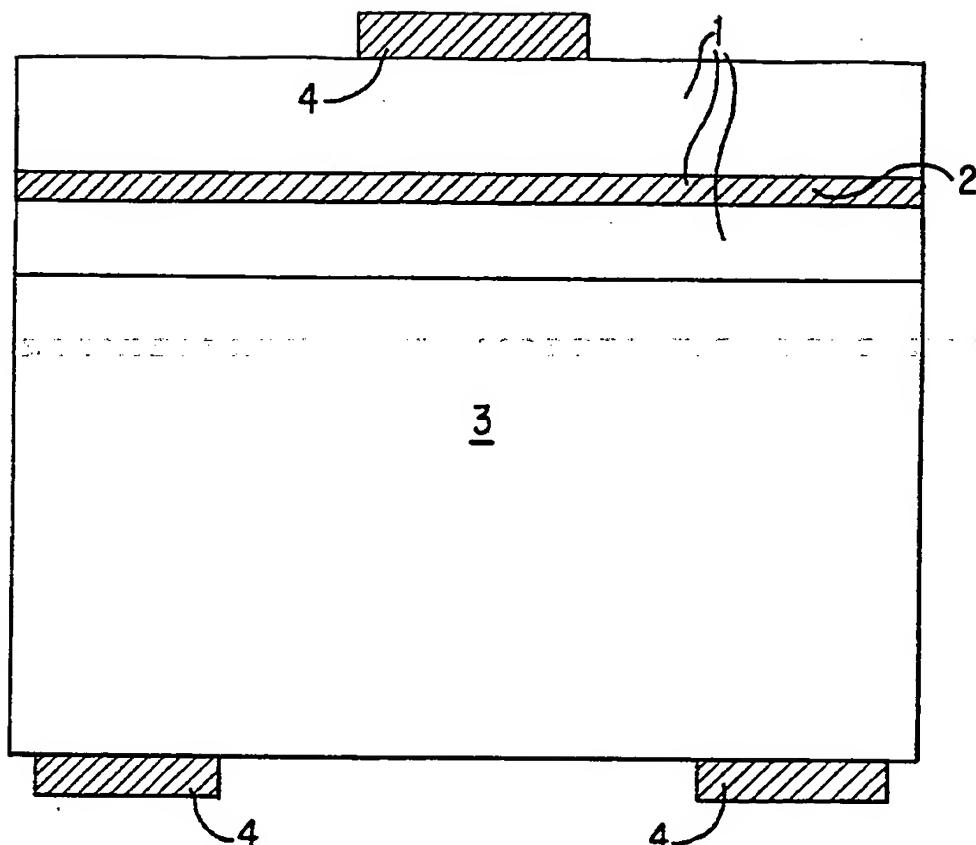


FIG. 6

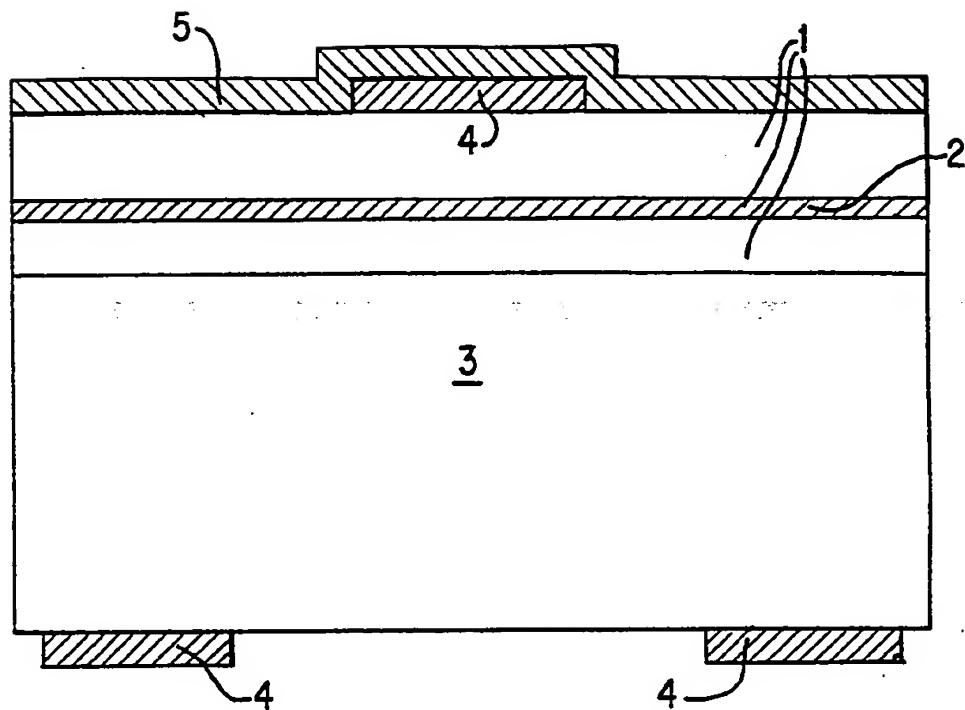


FIG. 7a

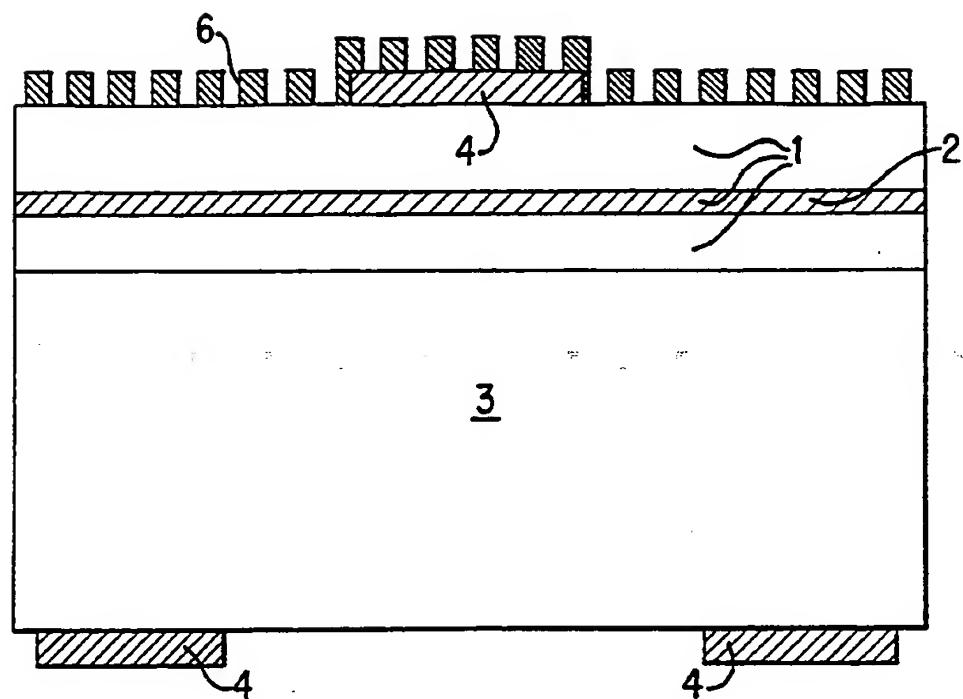


FIG. 7b

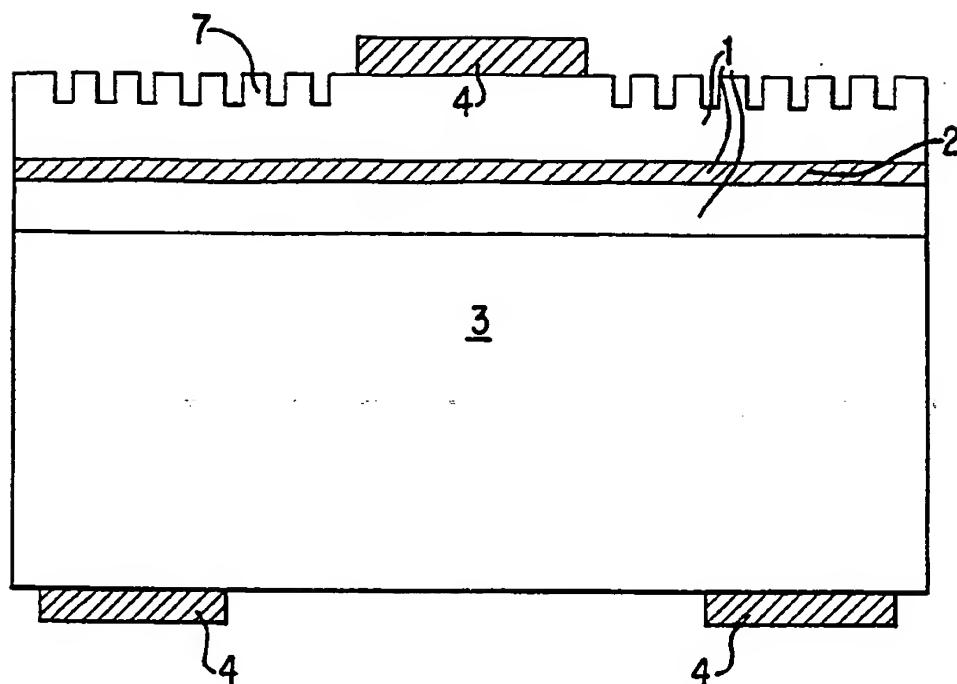


FIG. 7c

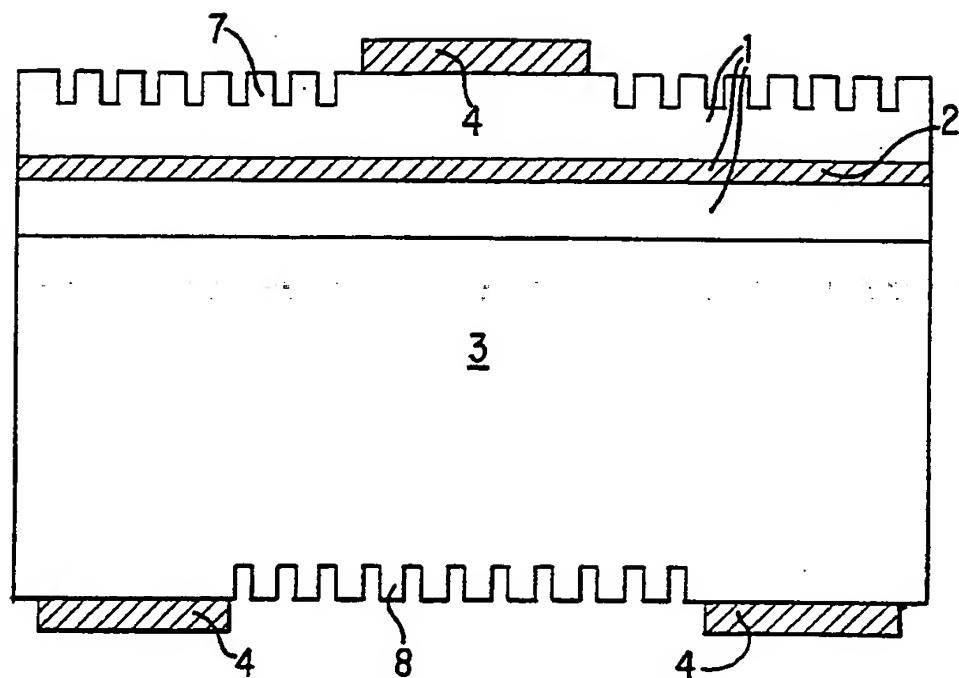


FIG. 8

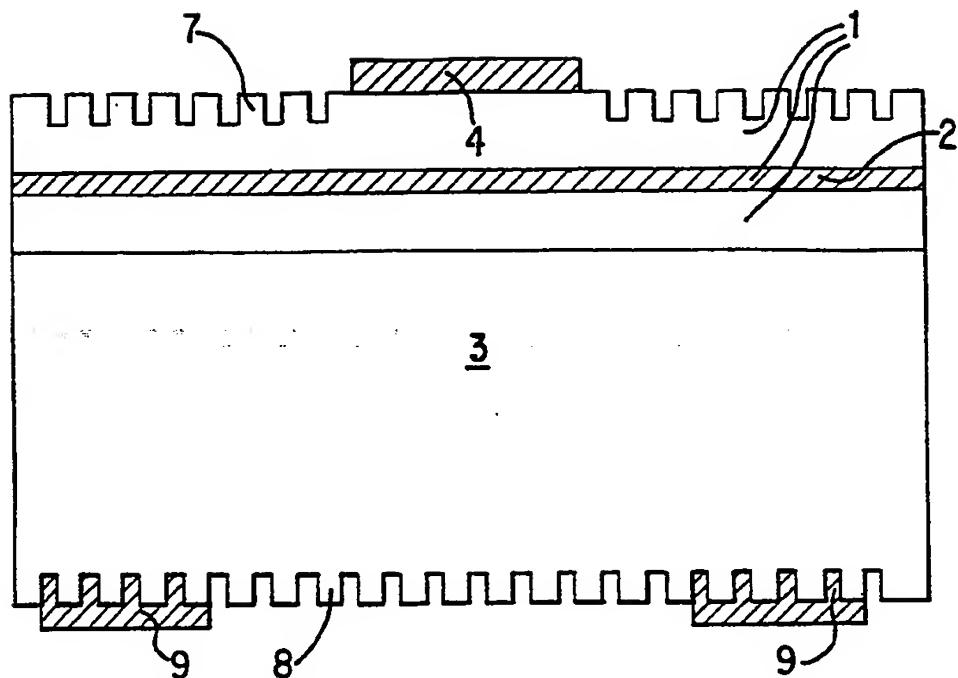


FIG. 9

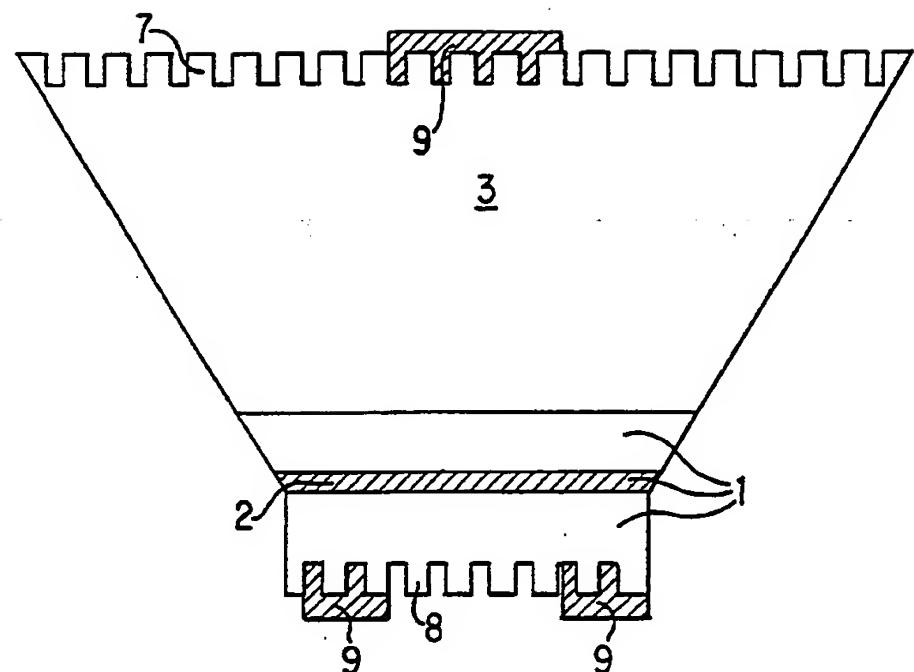


FIG. 10

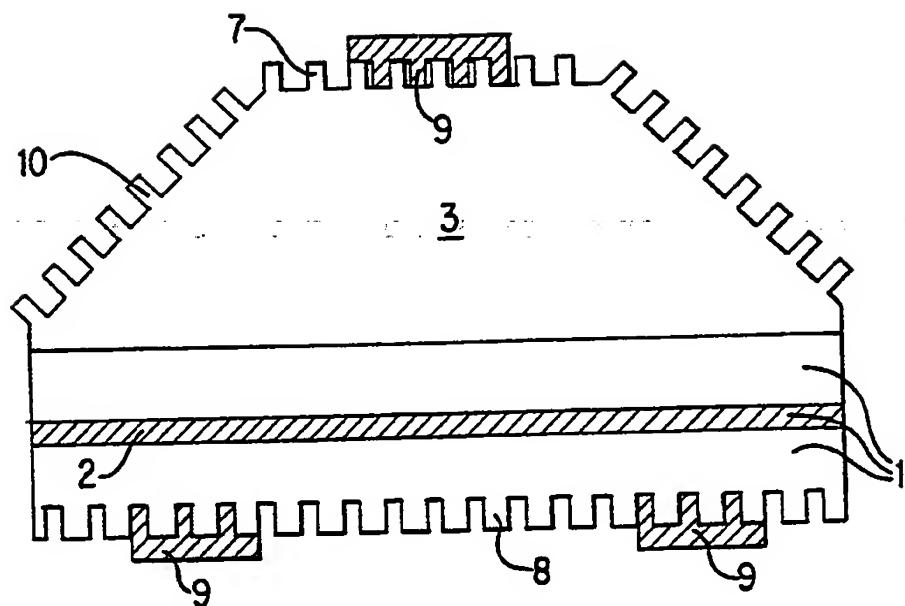


FIG. 11

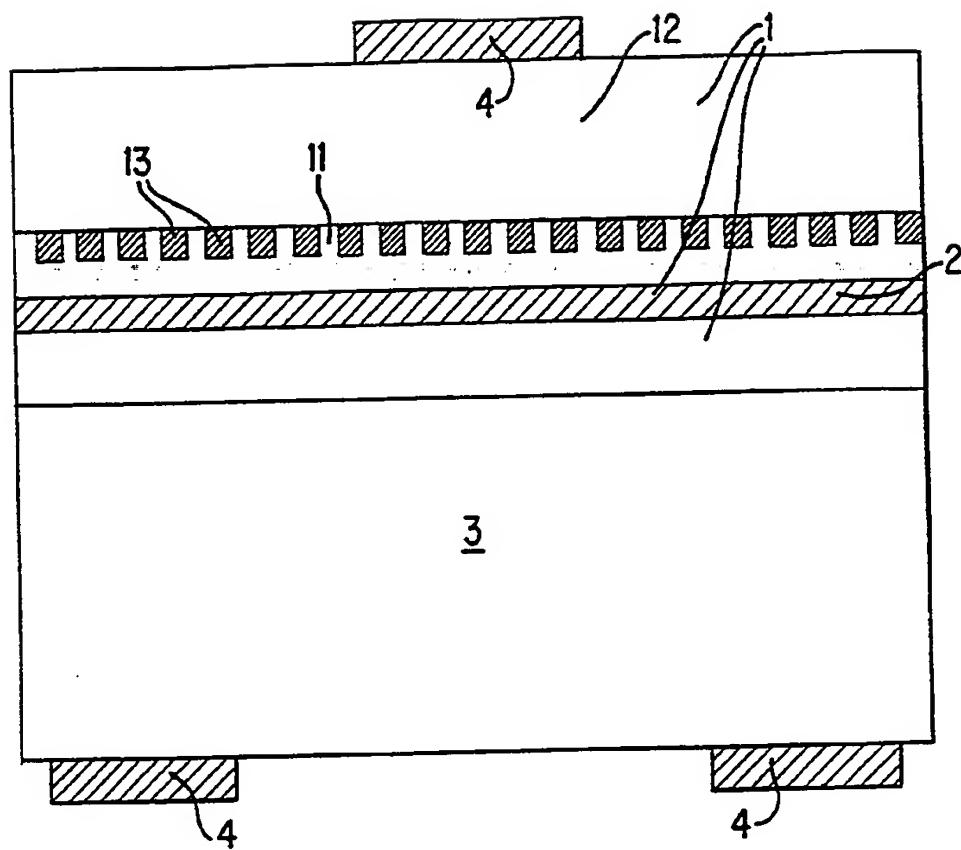
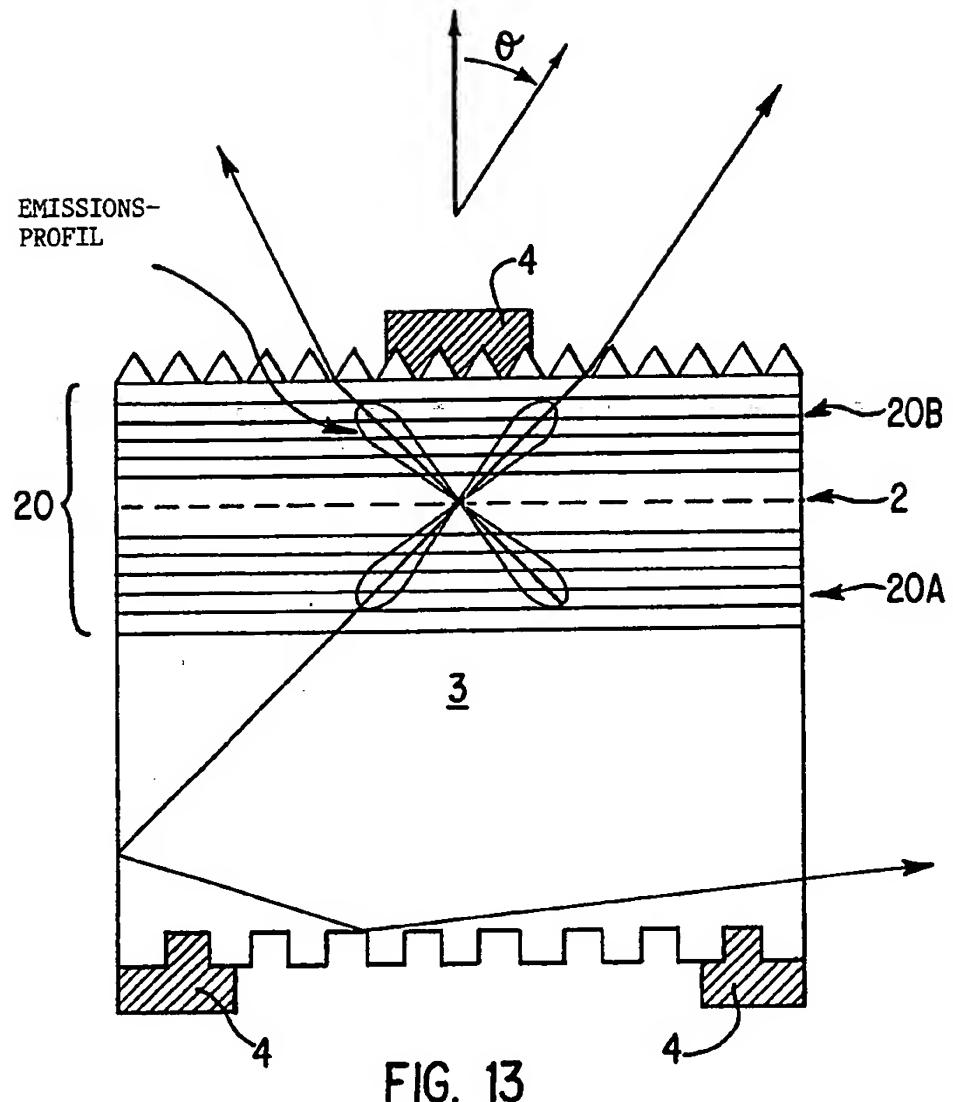


FIG. 12



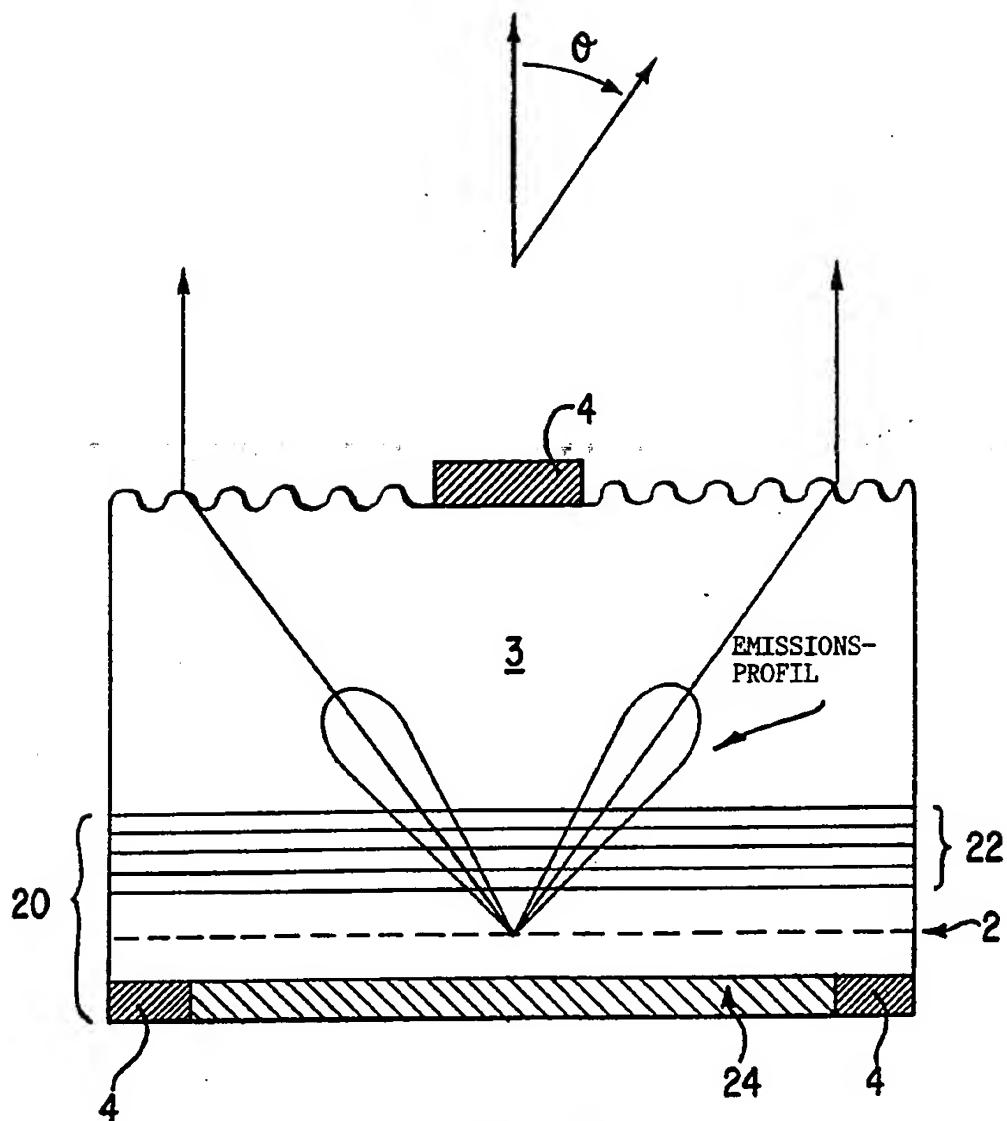


FIG. 14